

## ANÁLISIS DE ANTENAS PARABÓLICAS OFFSET EN BANDA X VARIANDO LA DISTANCIA FOCAL.

Daryl Ortega González<sup>1</sup>, Ariel Alejandro Aguiar Cartaya<sup>2</sup>, Pedro Arzola Morris<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE), Ave 114 #11901 e/ 119 y 127, La Habana, Cuba,

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE), Ave 114 #11901 e/ 119 y 127, La Habana, Cuba,

<sup>3</sup>Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE), Ave 114 #11901 e/ 119 y 127, La Habana, Cuba

<sup>1</sup>e-mail: <mailto:dortegag@tele.cujae.edu.cu>

### RESUMEN

En el presente artículo se ofrece al lector una panorámica general de las antenas de abertura. Se plantean las expresiones geométricas necesarias para el análisis de las antenas parabólicas de foco desplazado (offset), las que pueden ser tratadas como aberturas circulares y se analizan mediante la Óptica Geométrica (GO), seguida del Método de Distribución de los Campos en la Abertura con funciones modificadas y el cálculo de los campos radiados. Con el objetivo de elevar la precisión en la característica de radiación de las aberturas y aplicar el método en antenas parabólicas offset; se modifican las expresiones y se realiza un análisis de los parámetros de interés como la directividad, el nivel de lóbulos secundarios y el coeficiente de utilización de la abertura para distintas relaciones foco-diámetro con distinta iluminación. Del programa desarrollado para este propósito en el software Mathcad 14.0 se extrae que para antenas parabólicas offset de foco largo con iluminación asimétrica el ángulo de corrección se hace nulo, el nivel del primer lóbulo secundario tampoco varía y se mantiene en -26,4 dB y el coeficiente de utilización de la abertura es constante e igual a 0.8605.

**PALABRAS CLAVE:** Antena de Abertura, Antena Reflectora, Distancia Focal.

### ANALYSIS OF PARABOLIC ANTENNAS OFFSET IN X-BAND varying the FOCAL length

### ABSTRACT

Current article offers a general overview of the aperture antennas. Main geometric expressions for the analysis of the parabolic antennas of displaced focus (offset) are addressed, which can be treated as circular openings and analyzed by Geometric Optics (GO), followed by the method of distribution of the fields in the opening with modified functions and the calculation of radiated fields. With the aim of increasing precision in the radiation characteristic of the openings and applying the method in offset parabolic antennas. The expressions are modified and an analysis is made regarding parameters of interest such as directivity, level of secondary lobes and the coefficient parameter considering antenna aperture for different focus-diameter relationships with different illumination values. The program developed to this purpose in the software Mathcad 14.0 shows that for parabolic antennas with a long

focus offset with asymmetric lighting, the correction angle becomes null, the level of the first secondary lobe does not change and remains below -26.4 dB, the coefficient parameter to describe opening is constant and equal to 0.8605.

**KEYWORDS:** Aperture Antenna, Reflector Antenna, Focal Length.

## INTRODUCCIÓN

Las antenas de abertura poseen buena ganancia, directividad y ancho de banda [1] por lo que siempre reciben mucha atención al ser empleadas en múltiples aplicaciones [2]; entre ellas se destacan el Radar [3] y las comunicaciones móviles satelitales [4]. Cuando las antenas miden varias longitudes de onda [5], y especialmente si existen superficies metálicas de formas curvadas [3], es complicado calcular el vector de radiación de las corrientes; esto sucede a frecuencias de microondas, cuando la longitud de onda es del orden de los centímetros [6].

Las antenas de abertura son muy utilizadas en frecuencias de microondas [7]. En ellas la radiación se produce a partir de una superficie en la cual las fuentes de radiación, de acuerdo con el principio de equivalencia, siempre pueden representarse por corrientes superficiales eléctricas y magnéticas que pueden ser reales o ficticias (equivalentes) [8]. Sin embargo, para muchas configuraciones [9, 10], la distribución actual de corriente no se conoce exactamente y solo la intuición física o las mediciones experimentales pueden proporcionar una aproximación razonable [11].

Generalmente en las antenas de abertura se conocen con un cierto grado de aproximación los campos en la antena [12]. El caso más simple es la guía de ondas rectangular, que propaga el modo fundamental [13] y que se deja en circuito abierto. Se puede suponer que los campos en la boca de la guía son los mismos que en el interior [6]. Este mismo principio se puede aplicar a otro tipo de guía de ondas [14].

Si se aumentan las dimensiones de una bocina piramidal aumenta la directividad pero debido a la ley cuadrática de fase en la abertura esta no es tan significativa [15, 16]. El problema consiste entonces en cambiar el frente de onda esférico a uno plano. Una manera de lograr este cambio en el frente de onda a partir de la radiación de una bocina piramidal es con el empleo de un reflector o dos reflectores [17] en los casos más comunes. El análisis de los reflectores se puede realizar mediante técnicas de trazado de rayos [18] o la Óptica Geométrica, seguida del análisis del método de campos en la abertura y el cálculo de los campos radiados [19]. Un estudio más detallado de la radiación requiere el estudio de la difracción en los bordes. Para ello se desarrolló la Teoría Geométrica de la Difracción (GTD), aspecto que no se trata en el presente artículo. El análisis también puede realizarse a partir de las corrientes inducidas en la superficie del reflector, técnica que se denomina Óptica Física. En el estudio de las características de radiación y el diseño de las antenas de abertura [20-23], se tratan las aberturas con distribución continua en una superficie de revolución mediante el Método de la Distribución los Campos en la Abertura.

Hace algunos años, como resultado de las limitaciones tecnológicas, se empleaba tradicionalmente la función Lambda. Esta a su vez está constituida por las conocidas funciones Factorial, sustituida por la función Gamma y las funciones de Bessel de primera especie definidas para números enteros, como se aprecia en el método de Rush-Stincer [16].

Para diseñar la antena en casi la totalidad de los casos en las variables a operar se obtienen los resultados con números reales. De esta forma ambas funciones tienen que ser aproximadas al entero más cercano con la consecuente pérdida de precisión en la determinación del patrón de radiación. Esta aproximación conduce, al término del análisis, a errores en la predicción del patrón de radiación de las antenas y del nivel de los primeros lóbulos secundarios. A partir de aquí se nos presenta la situación de que determinar la característica direccional de las antenas parabólicas offset por el método de distribución de los campos en la abertura presenta algunas imprecisiones. Estas son necesario superarlas para acometer el diseño primario de antenas por métodos analíticos y para poder determinar los principales parámetros de estas, así como su comportamiento para distintas relaciones foco-diámetro ( $f/D$ ).

Se puede mejorar el método analítico para la determinación de la característica direccional mediante los campos en la abertura empleando funciones modificadas para números reales. El método mejorado se puede validar a partir de un análisis para distintas antenas. El objetivo fundamental del presente artículo es elevar la precisión en la determinación del patrón de radiación y en el cálculo de los principales parámetros de las antenas a partir de la modificación del método analítico de estimación de los campos en la abertura y llegar a conclusiones generales al aplicar dicho método en el análisis de antenas reflectoras offset para distintas relaciones  $f/D$ .

#### **GEOMETRÍA DE LA ANTENA PARABÓLICA OFFSET[24]**

La geometría parabólica offset se muestra en la Figura 1. El reflector se forma de una pieza de un paraboloides más grande cuya distancia focal está dada por la longitud del segmento  $\overline{ab}$ . La proyección del plano de abertura en un plano perpendicular al segmento  $\overline{ab}$  es un círculo, aunque la forma del borde del reflector es una elipse,  $\psi_0$  es el ángulo desde el eje de la parábola (segmento  $\overline{ab}$ ) al centro del cono del reflector delimitado por los segmentos que van desde el punto focal (b) hasta los bordes de la superficie reflectora.

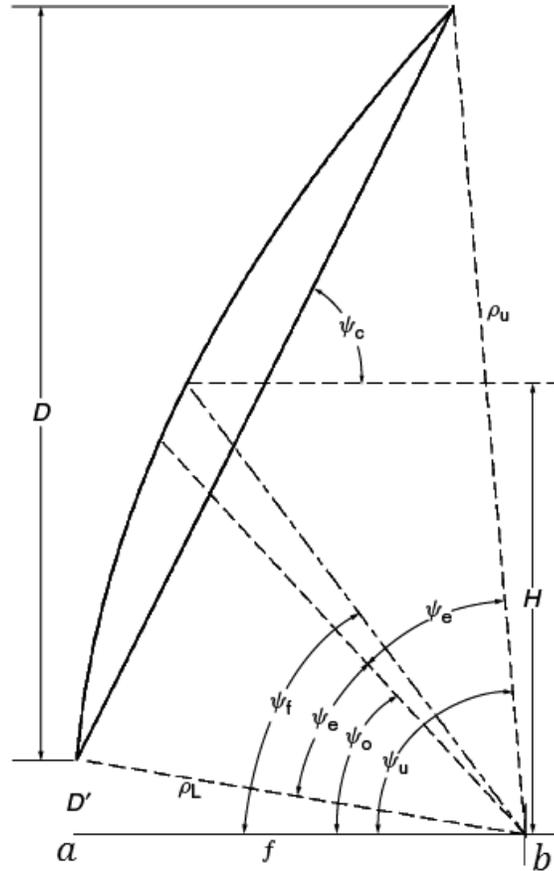


Figura 1: Parámetros de un reflector parabólico con alimentación Offset.

El reflector subtende un ángulo  $2\psi_e$  alrededor de esta línea central. Dado el diámetro del plano de apertura  $D$  y la altura  $H$  del centro, se calcula la compensación del borde inferior  $D' = H - D/2$ . A partir de estos parámetros se determina el ángulo  $\psi_0$ :

$$\psi_0 = \tan^{-1} \frac{16fH}{16f^2 + D^2 - 4H^2} = \tan^{-1} \frac{2f(D + 2D')}{4f^2 - D'(D + D')} \quad (1)$$

El ángulo medio del cono se define como:

$$\psi_e = \tan^{-1} \frac{8fH}{16f^2 + 4H^2 - D^2} = \tan^{-1} \frac{2fD}{4f^2 - D'(D + D')} \quad (2)$$

Se dirige la alimentación un ángulo  $\psi_f$  desde el eje z hasta el centro del diámetro proyectado diferente del ángulo  $\psi_0$  del eje del cono del borde:

$$\psi_f = 2 \tan^{-1} \frac{H}{2f} = 2 \tan^{-1} \frac{2D'+D}{4f} \quad (3)$$

El borde se encuentra a un ángulo  $\psi_c$  con respecto al eje z:

$$\psi_c = \tan^{-1} \frac{2f}{H} = \tan^{-1} \frac{4f}{2D'+D} \quad (4)$$

A partir de las expresiones (1) -(4) se calculan los ejes mayor y menor de la elipse ae y be. Por último, se calculan todos los ángulos para la nueva f/D.

El modelo del patrón de radiación usado para la antena excitadora o el alimentador es:

$$U(\theta) = \cos^{2N} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (5)$$

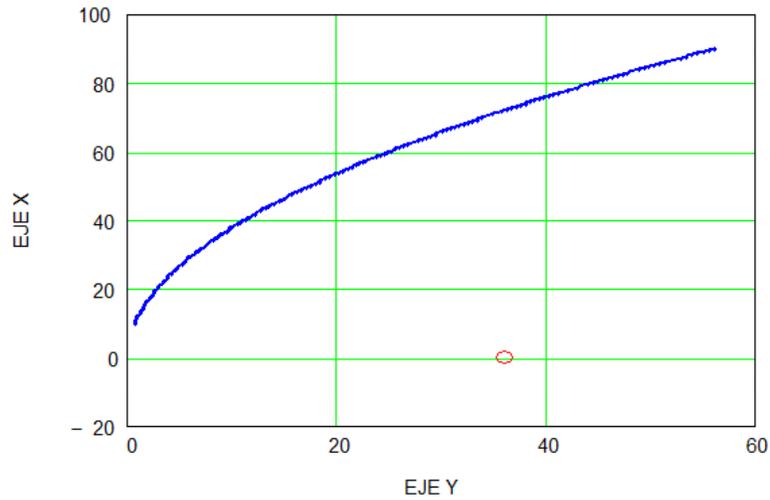
Al hacer uso de este modelo en Mathcad se desarrolla un programa para determinar el valor de N y el ángulo de corrección  $\alpha$  (ángulo que se le suma o se le resta al ángulo  $\psi_f$ ) óptimos para el nivel de campo deseado de -10 dB y una geometría determinada. El criterio de selección de -10 dB en los bordes de la parábola es aproximado y con él se obtienen decaimientos de los niveles de lóbulos secundarios con respecto al máximo de radiación desde 25 dB hasta 30 dB. Se destaca, para el correcto entendimiento de los temas que se tratan en este artículo, que el valor de N calculado se ajusta y varía en dependencia de la relación f/D en función de obtener mismos niveles de señal en los bordes superior e inferior de la parábola en el plano vertical (-10dB).

Los niveles de señal a lo largo de la superficie reflectora están dados por dos causas: La atenuación de la onda esférica en un factor  $\cos^2(\theta/2)$  y el patrón de radiación de la ecuación (5).

**ANÁLISIS DE LA ANTENA PARABÓLICA OFFSET CON  $f/D=0.2$  Y ÁNGULO DE MEDIA POTENCIA**

$(\theta_{3dB} = 3^\circ)$

Los datos iniciales del diseño son:  $f / D = 0,2$ ,  $D' = 10cm$ ,  $D = 80cm$  y una frecuencia de 9,4 GHz. A partir de estos datos se diseña la antena parabólica offset. Se hacen uso de las expresiones (1)-(4); el perfil de la antena parabólica se muestra en la Figura 2 y en la Tabla 1 se resume su dimensionamiento.



**Figura 2: Perfil de la antena parabólica para  $f/D=0,2$**

**Tabla 1: Dimensiones de la antena parabólica offset**

Parámetro	Valor
D	80 cm
D'	10 cm
f	36 cm
H	50 cm
f/D	0.2
f/D mod	0.45
$\psi_0$	$59,247^\circ$
$\psi_e$	$43,433^\circ$
$\psi_f$	$69,556^\circ$

$\psi_c$	55,222°
----------	---------

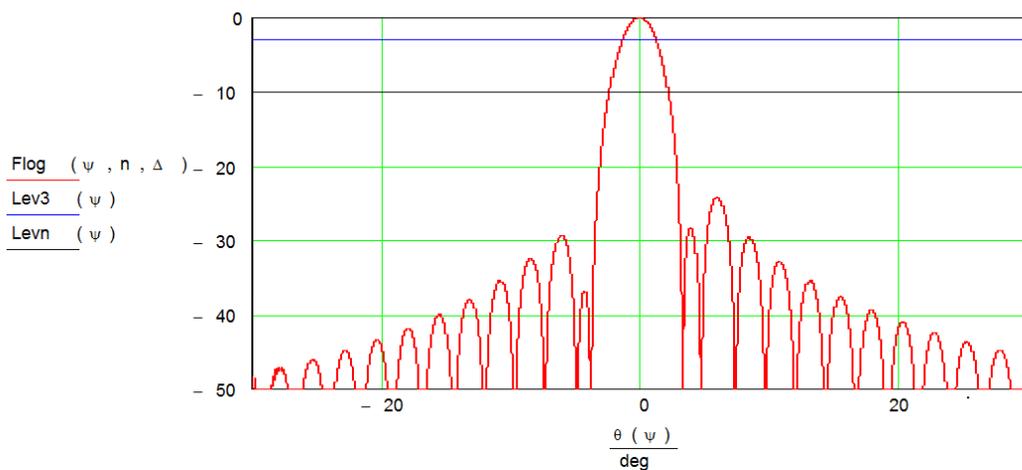
Además  $x_b=6,338$  cm es el punto más profundo del reflector,  $\rho_u=103$  cm y  $\rho_L=25,89$  cm son las distancias al borde superior e inferior respectivamente. Además  $a_e$  y  $b_e$  son 48,69 cm y 40cm respectivamente. Al calcular N a través de la ecuación (5) y aplicar una función de optimización en Mathcad a partir de un valor de entrada inicial, el valor de N y de  $\alpha$  obtenidos para esta configuración fueron:  $N=7,77845$  y  $\alpha=6,5980$ .

Estos valores de N y de  $\alpha$  al ubicar el alimentador provocan niveles de campo iguales en los bordes superior e inferior de la antena. El patrón de radiación tiene un Ancho del Haz de Media Potencia de 65o (ensanchamiento del patrón) aproximadamente. Este es un resultado esperado producto del bajo valor de  $N=7.77845$ . Se destaca que es de esperar un patrón de radiación con un Ancho del Haz de Media Potencia (HPBW) relativamente grande dada la distancia focal ( $f=36$  cm), foco corto.

A medida que la distancia focal aumenta el patrón de radiación del alimentador se hace más estrecho (N aumenta) para de esta forma poder garantizar mismos niveles de potencia en los bordes del paraboloide en el plano vertical. Se valida esta conclusión en los cálculos posteriores.

**Análisis asimétrico para  $f/D=0.2$**

En este caso el nivel de la señal en el borde superior e inferior de la superficie reflectora es de - 11.03627 dB y -7.88545 dB respectivamente para el valor de N de 7,77845. En el semiplano izquierdo va a existir una menor amplitud del campo producto a que la onda incidente recorre una mayor distancia que en la región de la derecha correspondiente al borde inferior del reflector. Para esta configuración al adaptar el Método de Distribución de los Campos en la Abertura para valores de n y de  $\Delta$  reales la función resultante de la antena normalizada en dB se muestra en la Figura 3. En dicha figura se muestran detalles del primer lóbulo secundario que no se aprecian al emplear números enteros.



**Figura 3: Función Resultante de la antena en dB**

En la Figura 3 se puede observar, como se esperaba, que el NLS (Nivel de Lóbulos Secundarios) es asimétrico debido a la iluminación asimétrica en los bordes de la parábola en el plano vertical. Se valida la proporcionalidad directa que existe entre el nivel de energía en los bordes y el nivel del primer lóbulo secundario. Se ilumina menos el borde superior (-11.03627 dB) que el inferior (-7.88545 dB). Lo anterior genera los primeros lóbulos secundarios mayores en donde hay mayor intensidad; en este caso en el borde inferior del reflector. En valores, se ve que una iluminación correspondiente a -7,88545 dB provoca un nivel del primer lóbulo secundario de -24,53 dB. Se extrae de la Figura 3 información de los primeros lóbulos laterales espurios, y como el máximo lóbulo lateral decae 25,47 dB con respecto al nivel máximo de radiación, valores previstos dada la selección de iluminación en los bordes a -10 dB.

El Coeficiente de Empleo de la abertura ( $\xi_A$ ) y la Directividad máxima de la antena parabólica son 0,878 y 37,35 dB respectivamente

### Análisis asimétrico para F/D=0.2

Para ese mismo valor de  $N = 7.77845$  si el ángulo de corrección  $\alpha = 6.598^\circ$  se le suma al ángulo  $\psi_f$ , la antena alimentadora ilumina de forma simétrica la superficie reflectora obteniéndose niveles en los bordes superior e inferior de -10dB. Como resultado el NLS es el mismo en ambos extremos. El nivel de lóbulos secundarios (-26dB) es el esperado. En la Tabla 2 se muestran el Coeficiente de Empleo de la abertura y Directividad máxima de la antena parabólica

Tabla 2: Parámetros para el análisis simétrico

Coeficiente de empleo ( $\xi_A$ )	Directividad máx (dB)	Ángulo ( $L_{\text{extB}} = -10\text{dB}$ )
0.861	37.273	2.651

### COMPARACIÓN Y RESULTADOS

En el apartado anterior se realiza un análisis detallado de la antena parabólica de foco desplazado offset para una relación f/D de 0.2. El estudio se realiza para el caso de iluminación asimétrica y simétrica a partir de los datos del dimensionamiento offset vistos en la Tabla 1. Se parte del dato inicial de diámetro de la superficie reflectora (D=80 cm) que garantiza un  $HPBW = 3^\circ$  y el criterio de  $D'=10\text{cm}$ .

Sin embargo, esto no es suficiente para ver el comportamiento general de los distintos parámetros de las antenas que se están teniendo en cuenta en este artículo al aplicar el Método de Distribución de los Campos en la Abertura con funciones modificadas variando la relación f/D y poder establecer conclusiones de este análisis. Con tal propósito la Tabla 3 muestra la variación de algunos parámetros de interés tomados en cuenta para las antenas parabólicas offset contra la relación f/D para el caso de iluminación simétrica y asimétrica. Se enfatiza el análisis para foco corto ( $f/D \leq 0.5$ ) y para foco largo ( $f/D \geq 0.5$ ).

Tabla 3: Comparativa de los resultados entre distintas relaciones f/D

Comparativa		Iluminación Simétrica				Iluminación Asimétrica				
f/D	N	NLS	$\theta_{3dB}$	$\xi_A$	$D_{max}$	$\alpha$ (grados)	NLS	$\theta_{3dB}$	$\xi_A$	$D_{max}$
0.2	7.7784 5	-26.637	2.651	0.861	37.273	+6.598	-24.214	2.628	0.878	37.356
0.2	13.067 5	-26.585	2.651	0.861	37.273	+1.724	-25.596	2.646	0.864	37.293
0.3	10.192 0	-26.59	2.651	0.861	37.273	-52.91	-22.637	2.504	0.944	37.676
0.3	25.118 5	-26.592	2.651	0.861	37.273	+0.125	-26.491	2.651	0.861	37.274
0.4	32.324 0	-26.604	2.651	0.861	37.273	-0.012	-26.581	2.651	0.860	37.273
0.4	40.399 5	-26.616	2.651	0.861	37.273	-0.057	-26.538	2.651	0.860	37.272
0.5	49.366 0	-26.613	2.651	0.861	37.273	-0.069	-26.527	2.651	0.860	37.272
0.6	70.026 0	-26.614	2.651	0.861	37.273	-0.062	-26.528	2.651	0.860	37.273
0.8	122.39 0	-26.624	2.651	0.861	37.273	-0.036	-26.555	2.651	0.860	37.273
1.0	189.60 0	-26.641	2.651	0.861	37.273	-0.021	-26.574	2.651	0.860	37.273
1.2	271.70 0	-26.631	2.651	0.861	37.273	-0.013	-26.608	2.651	0.860	37.273
1.3	318.34 0	-26.632	2.651	0.861	37.273	-0.01	-26.606	2.651	0.860	37.273
1.4	368.71 0	-26.633	2.651	0.861	37.273	-0.0085	-26.615	2.651	0.860	37.273
1.5	422.81 0	-26.636	2.651	0.861	37.273	-0.0070	-26.629	2.651	0.860	37.273

En la Tabla 3 se aprecia el comportamiento del Nivel de Lóbulo Secundario (NLS), ángulo de corrección ( $\alpha$ ), directividad máxima, ángulo de radiación de media potencia ( $\theta_{3dB}$ ) y coeficiente de utilización de la abertura ( $\xi_A$ ) al variar la relación  $f/D$  para iluminación simétrica y asimétrica.

### Angulo de corrección ( $\alpha$ en grados)

Como se dijo en el apartado 2 este ángulo se le suma al ángulo  $\psi_f$  para lograr que el patrón de radiación ilumine de forma igual los bordes superior e inferior de la superficie parabólica.

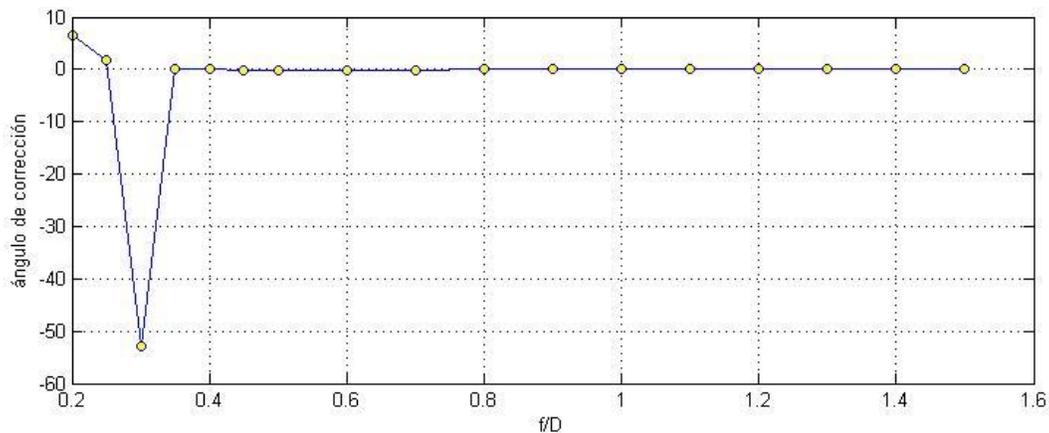


Figura 4: Relación ángulo de corrección vs  $f/D$ .

Se extrae de la Tabla 3 y se observa más claramente en la Figura 4 que a medida que aumenta la distancia focal deja de tener significación el ángulo de corrección ( $\alpha$ ). Para antenas de foco largo el ángulo de corrección pierde vigencia ya que es aproximadamente nulo, pero para antenas de foco corto sí influye como se puede apreciar.

En parábolas de foco corto ( $f/D \leq 0,5$ ) la diferencia de trayecto de la onda esférica en el borde superior con respecto al borde inferior es grande y el nivel de potencia en los bordes para un ángulo  $\psi_f$  difiere en gran medida, razón por la cual es necesario corregir la orientación de la antena excitadora en un ángulo  $\alpha$ . Para antenas de foco largo ( $f/D \geq 0,5$ ) la diferencia de recorridos se acerca a 0 por lo que el nivel de la señal en los bordes va a ser aproximadamente igual y el ángulo de corrección es aproximadamente cero. En el análisis de antenas parabólicas offset de foco largo no se toma en cuenta el ángulo de corrección. Para parábolas de foco corto este ángulo no se puede obviar en absoluto.

### Nivel de Lóbulo Secundario en dB (NLS)

El nivel de lóbulos secundarios se corresponde con el nivel de energía presente en los bordes.

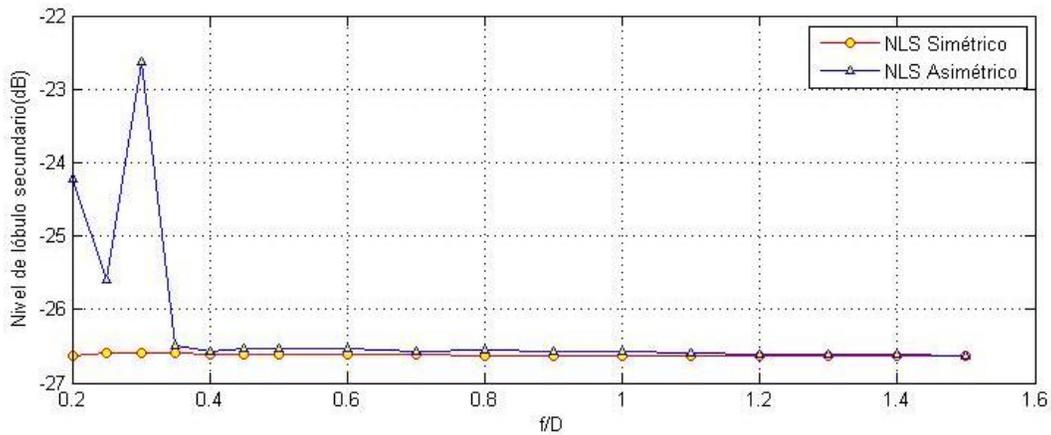


Figura 5: Relación NLS (dB) vs f/D

De la Figura 5 se extrae que los valores picos del nivel del primer lóbulo secundario para antenas de foco corto con iluminación asimétrica van desde -22.5 dB hasta -26.5 dB. Esto es resultado de la diferencia del nivel de la señal en ambos bordes. El criterio de selección del primer lóbulo fue el peor caso por lo que se corresponde con el mayor nivel de iluminación en el borde; en la mayoría de los casos el borde más iluminado es el inferior. En antenas con iluminación asimétrica para relaciones de ( $f/D \geq 0,5$ ) el nivel del primer lóbulo secundario se iguala al de iluminación simétrica (-26,6 dB) y se mantiene igual en ambos semiplanos; el NLS se mantiene prácticamente uniforme sin variar bruscamente producto de que la diferencia de recorridos de la onda es casi nulo.

**Ancho del haz de media potencia (HPBW)**

El HPBW no sufre variaciones significativas ya que este ángulo no depende de la distancia focal (f) ni tampoco de la relación f/D. EL HPBW depende del diámetro del reflector. Como nuestro análisis parte del dato inicial de diámetro del reflector de 80 cm, el valor del HPBW se mantiene aproximadamente constante.

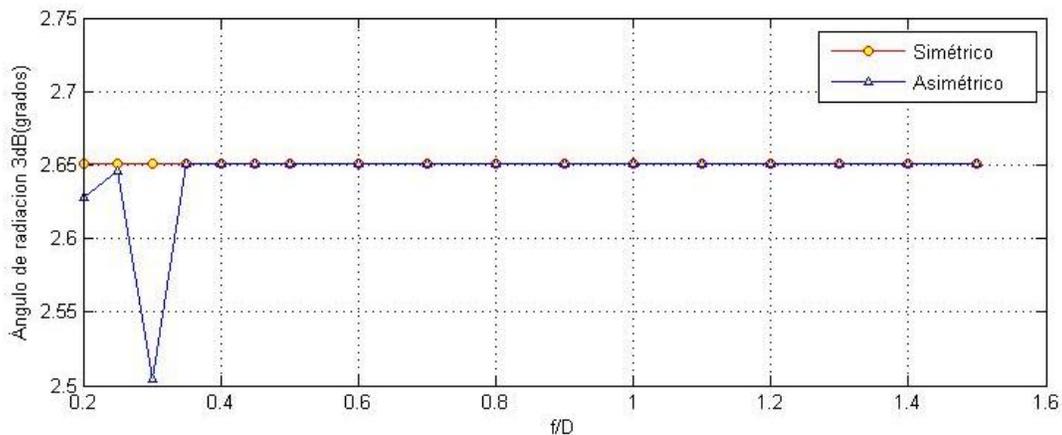


Figura 6: Relación f/D vs Ángulo de Radiación de Media Potencia

En la Figura 6 se ve que para una iluminación asimétrica a partir de la relación  $f/D = 0,35$  en adelante el ángulo de radiación de media potencia no se ve afectado. Para  $f/D$  menores a 0.35 sufre pequeñas variaciones que no ameritan un análisis más riguroso. En antenas de foco largo el HPBW se mantiene invariable a un valor de  $2.65^\circ$ .

### Directividad Máxima

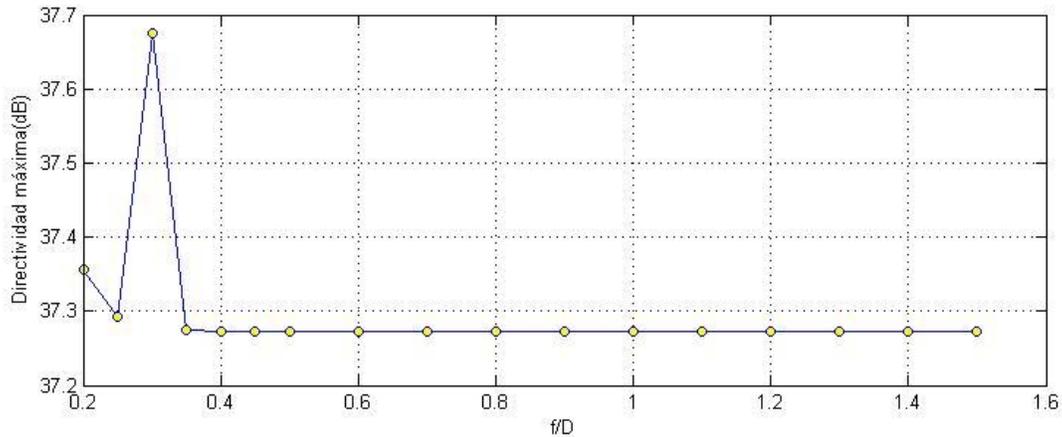


Figura 7: Relación Directividad Máx vs f/D.

En la Figura 7 para una iluminación asimétrica en el análisis de la Directividad máxima ocurre prácticamente lo mismo que con el ángulo de radiación. La Directividad solo sufre pequeñas variaciones para relaciones  $f/D$  menores a 0.35, ya que para mayores a esta se mantiene prácticamente invariable a un valor de 37.273 dB. Todo esto resulta lógico ya que para todas las mediciones se mantuvo un diámetro del reflector de 80 cm, las pérdidas de amplitud (ATL) y por desbordamiento (SPL) no varían ya que las mediciones se realizaron con distintos emisores que garantizan en los bordes del reflector unos -10 dB; es decir se emplearon emisores óptimos en cada caso como se dijo a inicios del artículo.

### Coefficiente de Utilización

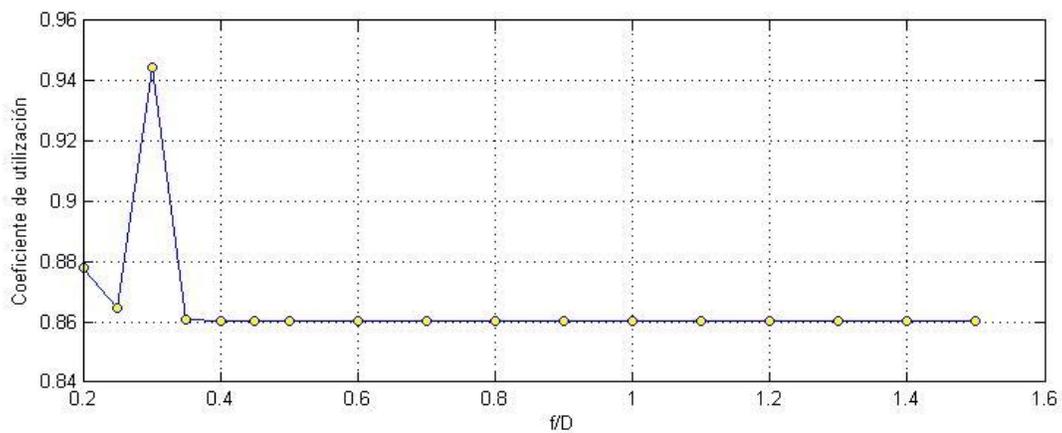


Figura 8: Relación entre el Coeficiente de Utilización vs f/D.

En la Figura 8 para el caso asimétrico la eficiencia de abertura cambia para relaciones  $f/D$  menores que 0.35 pero para mayores se mantiene constante a un valor de 0.8605. El valor de  $\xi_A$  depende de los niveles de la señal en los bordes y de la diferencia.

### Exponente del Patrón de Radiación (N)

El valor de N varía al aumentar la distancia del foco con respecto al diámetro del reflector. Se requiere patrones de radiación en el emisor cada vez más directivos para poder cumplir con los niveles de -10 dB en ambos bordes del reflector ya que el punto focal se aleja cada vez más de la superficie parabólica.

## CONCLUSIONES

A partir del Método de Distribución de los Campos en la Abertura con funciones modificadas se analiza una antena parabólica offset para relaciones  $f/D$  que varían de 0.2 hasta 1.5. De los resultados obtenidos se tiene que hay una relación directa entre el nivel de iluminación en los bordes y el nivel de lóbulos secundarios. El ángulo de corrección es nulo para antenas de foco largo ya que la diferencia de recorrido de la onda esférica en el borde inferior con respecto al superior es prácticamente cero. Para antenas de foco largo no varía el NLS y se mantiene en -26.4 dB. La directividad no varía al emplear en cada caso la antena excitadora óptima. A consecuencia de que los niveles de iluminación en la abertura son en todos los casos casi iguales (-10 dB) para antenas de foco largo el coeficiente de utilización se mantiene invariable e igual a 0.8605. A medida que aumenta la distancia focal el patrón de radiación del excitador se hace más directivo para poder obtener mismos niveles de potencia en los bordes. Se desarrollaron los métodos de cálculo y se implementaron para funciones modificadas en el software de desarrollo Mathcad.

## REFERENCIAS

1. ZHU, J., LIAO, S., LI, S., and XUE, Q. "60 GHz Dual-Circularly Polarized Planar Aperture Antenna and Array". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, vol 66, núm. 2, pp. 1014-1019.
2. YURDUSEVEN, O; PEARSALL, N; SMITH, D; FORBES, I; BOBOR-OYIBO, F. "A Solar Parabolic Reflector Antenna Design for Digital Satellite Communication Systems". Proc. 8th IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, Newcastle, United Kingdom, 2013, pp. 1-3.
3. DÍAZ LAZO, Yuniét; CHÁVEZ FERRY, Nelson; ARZOLA MORRIS, Pedro. "Caracterización de la antena del radar SON-9 ". Revista Cubana de Ingeniería, 2015, vol 6, núm. 1, pp. 57-65.
4. ZHANG, S; DU, J; LI, P. "Design of shaped offset cable mesh reflector antennas considering structural flexible property". IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, vol 11, núm. 7, pp. 1024-1030.
5. WAN, X; ZHANG, L; JIA, S.L; YIN, J.Y; CUI, T.J. "Horn Antenna with Reconfigurable Beam-Refraction and Polarization Based on Anisotropic Huygens Metasurface". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, vol 65, núm. 9, pp. 4427-4434.
6. FERRANDO, M.V.A. "Libro de Antenas ": Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya,1998.
7. ORTEGA GONZÁLEZ, Daryl; FONTE VALDÉS, Lázaro, MENDES-MONSANTO SOSA, Andres; ARZOLA MORRIS, Pedro. "Diseño de antena de bocina corrugada a 3 GHz para uso en cámaras anecoicas". Telemática, 2017, vol 16, núm. 3, pp. 1-14.
8. PÉREZ STINCER, Enrique. "Antenas Teoría General". Ciudad de la Habana: Imprenta ITM José Martí, 2001.No Registro:07253-7253

9. FONSECA, N.J.G; GIRARD, E; LEGAY, H. "Doubly Curved Reflector Design for Hybrid Array Fed Reflector Antennas". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, vol PP, núm. 99, pp. 1-1.
10. ROJAS-NASTRUCCI, E.A; NUSSBAUM, J.T; CRANE, N.B; WELLER, T.M.. "Ka-Band Characterization of Binder Jetting for 3-D Printing of Metallic Rectangular Waveguide Circuits and Antennas". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, vol 65,núm. 9, pp. 3099-3108.
11. BALANIS, C.A. "Modern Antenna Handbook".John Wiley And Sons, 2008.
12. ORFANIDIS, S.J. "Electromagnetic Waves and Antennas" .Rutgers University,2002.
13. GU, D; LU, X; GINLEY, R. "Efficient Rectangular Waveguide-to-Stripline Transition in D-Band". IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017,vol 27, núm. 8, pp. 688-690.
14. CHANDRA, A; DAS, S. "Application of SRR to achieve performance improvement and multi-band characteristics in aperture antennas".IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, vol 11, núm. 7, pp. 990-996.
15. ORTEGA GONZÁLEZ, Daryl; ARZOLA MORRIS, Pedro."Diseño de antena de bocina con corrugaciones variables para aplicaciones de Radar". Convencion Internacional Informática 2018,VIII Simposio de Telecomunicaciones, La Habana,Cuba,2018 .
16. PÉREZ STINCER, Enrique. "Técnicas de Antena".Ciudad de la Habana: Imprenta ITM José Martí, 2007.No Registro:07253-7254
17. RODRÍGUEZ, C.S; MARTÍNEZ, A.T.A. "Optimización de sistemas Cassegrain utilizando algoritmos genéticos". Revista Cubana de Ingeniería, 2012, vol 3, núm. 1, pp. 63-69.
18. JAZI, B; DAVOUDI-RAHAGHI, B; KHAJEHMIRZAEI, M.R; NIKNAM, A.R. "Energy Distribution Along the Focal Axis of a Metallic Cylindrical Parabolic Reflector Covered With a Plasma Layer". IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, vol 42, núm. 2, pp. 286-292.
19. CONSTANTIN, D; NICOLAE, P.M. "Analysis of a Parabolic Antenna with Fed". Electronics, Computers and Artificial Intelligence(ECAI), Bucharest, ROMÂNIA,2014 .
20. POLYCARPOU, A.C; CHRISTOU, M.A. "Closed-Form Expressions for the On-Axis Scattered Fields by a Subwavelength Circular Aperture in an Infinite Conducting Plane". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, vol 65, núm. 2, pp. 978-982.
21. K, S; R, A.V; H, J.M; CHOUDHURY, B; NAIR, R.U. "EM Design of Ground Based Hemispherical Radome Enclosed Parabolic Reflector Antenna". 2nd IEEE International Conference On Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology (RTEICT), India,2017 .
22. MATEO, J; TORRES, A.M; BELENGUER, A; BORJA, A.L. "Highly Efficient and Well-Matched Empty Substrate Integrated Waveguide H-plane Horn Antenna". IEEE Antennas and Wireless Propagations Letters, 2016,vol 15, pp. 1510-1513
23. GHAFAR, A; ALKANHAL, M.A.S. "Electromagnetic Field Intensity Distribution Along the Focal Region of a Metallic Parabolic Reflector Covered With a Plasma Layer Under Oblique Incidence". IEEE Transactions On Plasma Science, 2015, vol 43, núm. 11, pp. 3801-3807.
24. MILLIGAN, T.A. "Modern Antenna Desing ". John Wiley and Sons, 2005, 2nd edn.